独库高速阿尔先沟段雪崩空间分布及因子探测

程秋连[1,2]， 刘 杰[1,2]， 杨治纬[2]， 张天意[1,2]， 王 斌[2]

（1. 新疆农业大学交通与物流工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司科技研发中心，新疆 乌鲁木齐 830006）

摘 要： 拟建独库高速公路阿尔先沟段地貌以高山峡谷为主，由于降雪和气候变化，雪崩频发。利用无人机遥感解译与现场调研协同调查的方法识别92个雪崩点，选取高程、坡度、地表切割度、地面粗糙度，积雪期最大积雪深度、最大风速、平均温度和平均降雪量为驱动因子，运用地理探测器分析不同分辨率地形因子与雪崩稳定性的关系。结果表明：本研究区雪崩发育较为活跃，稳定性较差，但较多雪崩释放区、运动区位于山体坡面，堆积区位于远离拟建线路的谷底，对拟建线路影响较小。通过地理探测器分析，坡度、地面粗糙度对雪崩稳定性解释力与分辨率呈正相关，高程、地表切割度呈负相关，交互探测结果均是双因子增强或者非线性增强，且非线性增强比双因子增强更加显著，坡度与其他因子结合对雪崩稳定性影响至关重要。本研究可为雪崩易发性、危险性评价工作提供可靠的数据支撑，为独库高速公路的建设运营提供科学依据。

关键词： 阿尔先沟；雪崩；地理探测器；驱动因子；空间分布

雪崩作为危害性较大的山区自然灾害之一，常常摧毁森林、阻碍交通路线，对人民的生命、生产、生活造成严重的威胁[1-2]。目前，雪崩灾害与实现人与自然和谐相处、社会可持续发展之间的矛盾依旧突出，例如，2023年4月，发生在珠穆朗玛峰南坡昆布冰川地区的雪崩造成3人失踪；2023年1月，发生在西藏林芝市派镇至墨脱公路的雪崩造成28人遇难；2019年2月11日，天山果子沟突发雪崩，阻断交通，导致两百余辆车辆滞留。因此，掌握雪崩灾害影响因子驱动力以及雪崩空间分布特征，以提高区域雪崩灾害防治减灾能力，也是保障山区经济发展，人民生产、生活安全的关键一环[3-5]。

雪崩发育受地形、气候、积雪等多种因素的影响[6-8]。郝建盛等[9-10]对亚洲高山区雪崩灾害的诱发因素进行分析，得出雪崩的发生较多是由自然环境条件所致，其中，强降雪在诱发雪崩事件中占比最多，春融气温快速升高也是雪崩诱发的主要因素。山谷风可以改变积雪分布，对新雪雪崩发育产生重要影响[11]。积雪深度是雪崩发育的主要影响因素之一，Liu等[12]分析了天山部分区域的积雪深度空间分布情况。地形条件是雪崩发育恒定不变的影响因素，包含坡度、地面粗糙度、地表切割度等[13]。地貌形态复杂多样，研究对象的地貌形态分类精度仍然不够理想[14]。雪崩灾害发育影响因素较多，但目前雪崩灾害影响因素规律认知尚未统一。雪崩影响因子探测是雪崩风险管理的基础，是雪崩易发性、危险性分区的重要前提，同时也是雪崩防治、土地利用规划和道路选线等工程设计必不可少的环节[15-17]。

地理探测器是一种用于探究空间分异性，以及揭示其背后驱动力的统计学方法[18-19]，周金等[20]运用地理探测器分析了广西泥石流的空间分布以及坡度、地形起伏度、降雨等8个驱动因子之间的关系；季建万等[21]运用地理探测器对京津冀城市群地质灾害驱动因子进行研究，结果显示，坡度和高程对该区域的驱动力较高，且因子之间的交互作用是双因子增强和非线性增强，多因子的交互探测在其他地质灾害中研究较多，但对于雪崩影响因子研究

收稿日期： 2023-06-27； **修订日期：** 2023-10-16

基金项目： 交通运输行业重点科技项目（2022-ZD6-090）；新疆交通运输科技项目（2022-ZD-006）；新疆交投集团2021年度"揭榜挂帅"科技项目(ZKXFWCG2022060004)；新疆交通设计院科技研发项目（KY2022021501）

作者简介： 程秋连（1998-），女，硕士研究生，主要从事公路冰雪灾害研究. E-mail: 878583994@qq.com

通讯作者： 刘杰. E-mail: hfutliujie@163.com

相对匮乏。地理探测器不仅可以分析单因子的影响程度,还可以探测多因子的交互作用程度[22-23],研究区域的雪崩灾害发生较为频繁、破坏性较大,运用地理探测器分析可以实现雪崩诱发因素的定量评价。

采用地理探测器为主要分析,以无人机现场调查识别的拟建独库高速公路阿尔先沟段92处雪崩为研究对象,根据促进雪崩发育的地形特征、气候积雪特征确定的8个驱动因子进行综合分析,定量探测天山山区雪崩灾害易发性的影响因素,检测各个驱动因子对雪崩空间分布的驱动力,分析双因子作用下雪崩灾害的影响程度。

1　研究区概况

天山地处欧亚大陆腹地,贯穿新疆南北,是世界上距离海洋最远的山地系统[24],水汽主要的来源是西风环流的西来水汽,其次是北冰洋的干冷气流,西风环流大西洋、黑海、地中海的空气水分被上升的地形阻挡,因此,在寒冷季节该地区大量降雪,导致天山中部雪崩频繁发生[1,5,25]。

拟建项目独库高速公路由北向南横穿中天山山脉,沿线雪峰雄峙、冰川遍布。本研究选取阿尔先沟段作为研究区(图1),在14 km主要雪崩区内,雪崩频繁而集中,有近百处之多。该段海拔约2000~3500 m,沟谷两侧山体地形起伏较大,山势陡峭,斜坡坡度一般在40°~60°之间,为雪崩发育提供较好的地形条件。年平均温度在-6 ℃以下,最低气温为-42 ℃,冬半年(10月至次年4月)为主要降雪期,此期间降雪量总计350 mm左右,最大降雪总量可达394 mm以上,为雪崩发育提供较好的物质条件。

2　模型方法与数据来源

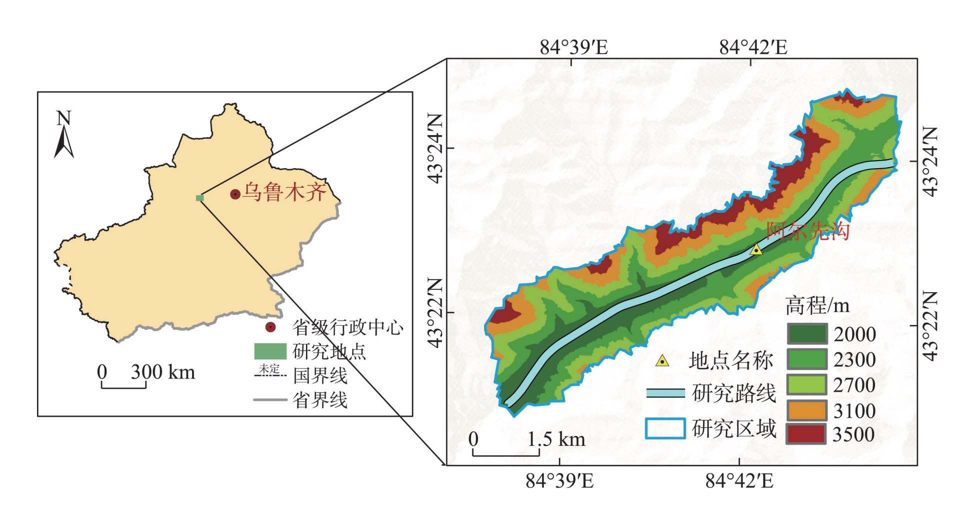
2.1　地理探测器

地理探测器不仅可以探测数值型数据和定性数据,还可以探测两影响因素对因变量的交互作用[18]。基于此,利用地理探测器中的因子探测及交互作用探测分析阿尔先沟段92个雪崩点空间分布和不同的驱动因子对雪崩稳定性的影响程度。

2.2.1　分异与因子探测　分异与因子探测用于探测因变量Y雪崩稳定性的空间分异性,以及某个自变量X对于因变量Y的空间分异性的解释力[26],用q值表达自变量对雪崩灾害的解释力大小,表达式如公式(1)~公式(3)。q的值域为[0,1],q值越接近1,说明因变量Y雪崩稳定性的空间分异性越明显,自变量X对因变量Y雪崩稳定性的解释力越强,否则越弱。特殊情况下,q=1时说明自变量X完全掌控了因变量Y的空间分布,q=0时说明自变量X与因变量Y没有任何关系。

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \sigma_i^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{1}$$

$$SSW = \sum_{i=1}^{n} N_i \sigma_i^2 \tag{2}$$



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4619号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区域图

Fig. 1　Study area plot

$$SST = N\sigma^2 \tag{3}$$

式中：q 表示某影响因素对雪崩稳定性的解释力；i 表示 $i = 1,2,\cdots,n$；N_i 表示 i 分类的单元数；σ_i^2 表示 i 分类的因变量 Y 值的方差；N 表示研究区域的单元总数；σ^2 表示研究区域因变量 Y 值的方差；SSW 表示 n 类方差之和；SST 表示研究区域内的总方差值。

2.2.2　交互作用探测　交互作用探测用来探究不同影响因素相互作用的效果，即影响因素 X_1 与 X_2 共同作用时使得因变量 Y 雪崩稳定性的影响力增强、减弱或相互独立。首先计算出 X_1 与 X_2 对因变量 Y 雪崩稳定性的解释力 $q(X_1)$、$q(X_2)$，其次，计算出相互作用后的 $q(X_1 \cap X_2)$，具体的双因子交互依据见表1。

2.2　数据来源

2.2.1　雪崩点数据　根据拟建高速公路雪崩灾害的孕育环境以及路基、桥梁、隧道洞口等构造物，针对雪崩发生的位置、抛程、对公路的影响、运动轨迹、积雪密度和温度等方面展开调查。利用现场调研与无人机遥感解译共提取出潜在雪崩灾害点92处，雪崩点分布如图2所示。

2.2.2　基础数据　数字高程模型（Digital Elevation Model DEM）是高程数据对地表地形数字化的表达，通过大疆经纬M300 RTK无人机，搭载禅思H20摄像头拍摄亚米级影像,运用多视点三维建模获取密集点云数据，生成三维模型,获取分辨率为0.43 m的高精度DEM；为了进一步分析地理探测器在空间尺度上的敏感性，在NASA地球科学数据网站获取分辨率为12.5 m的DEM，利用ArcMap10.8软件提取研究区域不同分辨率下的地形因子。根据研究区域周边气象站统计出的气象数据，采用空间插值法获取本研究区的气候积雪因子。以上驱动因子均在WGS_1984_UTM_Zone_44N坐标系下处理。

2.3　雪崩驱动因子的选取

不同的影响因素引起雪崩发生的概率不同，本文结合阿尔先沟段地形、气象以及积雪条件提取地形因子，气象积雪因子，在众多的影响因素中选取适用于本研究区雪崩稳定性的驱动因子。

2.3.1　不同分辨率的DEM地形驱动因子　地形数据是预测雪崩时恒定不变的参数[27-28]。通过调查发现，研究区域内雪崩盛行，较易发生中小型雪崩灾害。同时，考虑到山坡坡度对积雪厚度的影响，高程和坡度决定着雪崩的规模和频率的大小[29]。而对于大区域的雪崩预测而言，单一参数往往不能反映区域地形形态[30-31]，统计起来较为困难，因此，引用地表切割度和地面粗糙度这类复合参数来衡量区域雪崩的稳定性，并揭示地形形态与积雪之间的关系。

2.3.2　气候积雪条件下的驱动因子　雪崩灾害的诱发主要是由风、温度、强降雪等自然因素为主[9,25]。天山山区雪崩较多由强降雪引起[32]，在初春，温度突然升高造成积雪失稳，气温的高低不但对地表蒸发造成影响，且影响冰雪融化速度，在一定程度上决定积雪面积和积雪深度，天山山区气温相对较低，多以固态降水为主，为雪崩发育创造了物质条件。在山坡上，积雪深度越高稳定性越低，进而增大雪崩发生的概率。此外，有学者指出风吹雪较自然降雪更易诱发雪崩，山谷风对积雪以及降雪中的二次搬运，增加山谷部分坡面积雪深度，导致雪层中的力增加，从而增加雪崩的不稳定性[30]。研究温

表1　交互作用探测依据

Tab. 1　Interaction probing basis

判断依据	交互图示	交互性
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$		非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$		单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$		双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$		相互独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$		非线性增强

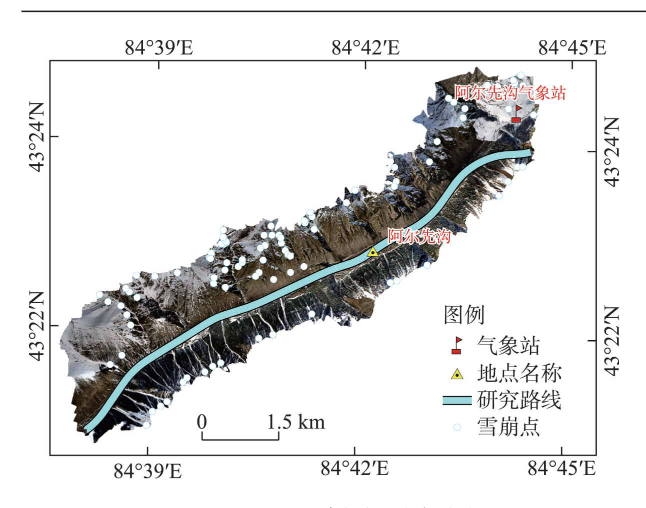


图2　无人机遥感解译雪崩分布

Fig. 2　Remote sensing interpretation of UAV avalanche distribution diagram

度、风速、降雪量、积雪深度可以更好地揭示气候积雪因子在时间上、空间上雪崩发育的关系。

综上所述，将高程、坡度、地表切割度、地面粗糙度、最大积雪深度、平均温度、最大风速、平均降雪量8个影响因素作为本研究区域雪崩稳定性的重要指标。

3　雪崩的分类与空间分布

3.1　雪崩的分类

3.1.1　雪崩稳定性分类　运用ArcGIS软件将高程、坡度、地表切割度、地面粗糙度、最大积雪深度、平均温度、最大风速、平均降雪量8个驱动因子叠加分析，叠加结果采用自然间断点法将雪崩分为稳定、相对稳定、稳定性较差、不稳定、极其不稳定5个等级[26]。

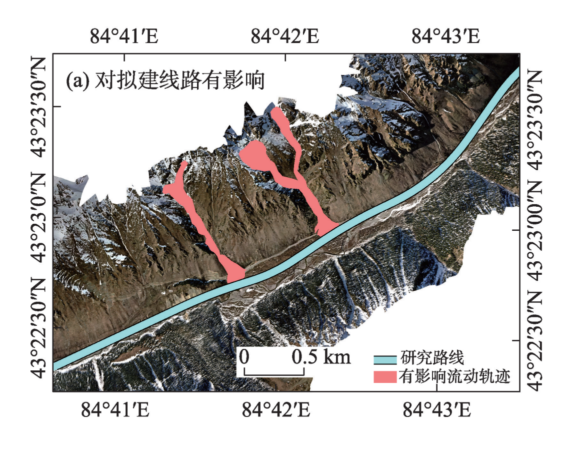
根据地形、积雪、气候等多方面判定，稳定性较差的雪崩数量最多，达45处；稳定以及相对稳定的雪崩数量占雪崩总量较少，具体雪崩稳定性分类见表2。总体而言，稳定性较差、不稳定、极其不稳定的雪崩占总数的73.9%，由此得出，该研究区段雪崩发育较为活跃，稳定性较差。

表2　雪崩稳定性分类

Tab. 2　Avalanche stability classification

稳定性分级	雪崩数量/个	所占比例/%
稳定	6	6.5
相对稳定	18	19.6
稳定性较差	45	48.9
不稳定	18	19.6
极其不稳定	5	5.4

3.1.2　雪崩对拟建高速公路影响分类　通过无人机拍摄亚米级影像解译出雪崩形态，判断雪崩对拟建线路的影响(图3)。雪崩流动轨迹运用Ramms-avalanche软件模拟分析，依据崩落方向、抛程、运动轨迹等多方面雪崩特性，将研究区域的雪崩对拟建独库高速公路路基、桥梁、隧道洞口等的影响程度分为无影响、影响一般、影响较重、影响严重4级。无影响雪崩的释放区、运动区、堆积区均对拟建道路不构成影响；影响一般的雪崩堆积区位于拟建路线边缘，发生大型雪崩可能在拟建线路上堆积，但对拟建线路构筑物不构成影响，或运动区有桥梁、隧道跨越通过；影响较重雪崩判别依据为拟建线路以路基形式通过，发生中型以上雪崩可能在拟建线路上堆积，对行车安全造成影响；影响严重的雪崩，抛程远、冲击力较大，其运动区、堆积区对拟建道路的路基、桥梁、隧道洞口等构筑物造成严重影响，甚至侵占整个拟建路线路幅宽度，对行车安全造成严重



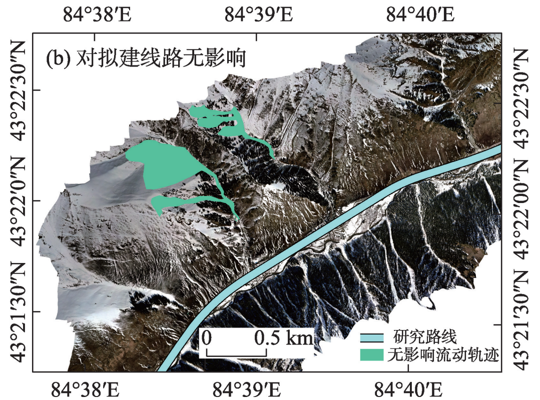


图3　雪崩对拟建线路影响轨迹

Fig. 3　Impact trajectory of the avalanche on the proposed highway

影响。

根据实地调查与遥感解译显示，拟建独库高速公路阿尔先沟段共发现92处雪崩，其中，对拟建线路无影响的雪崩最多，对拟建线路影响较大的雪崩仅有9处，其运动区和堆积区均侵占特殊构造物，对拟建高速公路影响分类见表3。本研究区域虽雪崩频发，但较多雪崩释放区、运动区对拟建线路无影响，堆积区位于远离拟建线路的谷底。

3.2 雪崩空间上的分布

本研究利用AcrGIS软件中的重分类工具将8个驱动因子分为5类，分类分级结果见表4，并绘制出研究区域8个驱动因子雪崩分类数量比例特征（图4、图5）。在高程2400~2700 m雪崩数量最多，达到57处，其次是2700~3000 m雪崩32处，在天山山区高程3000 m上下雪崩发育较为频繁；在坡度为30°~45°区域，雪崩最为活跃，达到50处，山坡的坡度与雪崩的发育相关性较大；而对地面粗糙度分析中发现，地面粗糙度在0.2~0.4，雪崩数量最多，占雪崩总量的一半，地面粗糙度值越大表示地面越粗糙，阻碍雪崩的发育。随着最大积雪深度、最大风速的增大，雪崩数量逐渐增多，积雪深度越大，压力越大，造成山体积雪发育为雪崩。

表3 对拟建高速公路影响分类

Tab. 3 Classification of the impact of the proposed highway

对拟建线路的影响	雪崩数量/个	所占比例/%
无影响	59	64.2
影响一般	12	13
影响较重	12	13
影响严重	9	9.8

4 结果与讨论

4.1 雪崩因子探测结果分析

皮尔逊（Pearson）相关系数仅能分析2个变量之间的线性相关，灰色关联度仅反映出曲线间的关联程度[33]；与上述2种方法进行比较，地理探测器不仅可以探测单因子的空间分异特性，还可以探测两影响因素对因变量的交互作用。本研究主要运用地理探测器分析分辨率0.43 m、5 m、10 m、12.5 m、20 m的地形因子与雪崩稳定性的关系以及雪崩影响因

表4 雪崩影响因子分类分级

Tab. 4 Classification and classification of avalanche impact factors

地形因子			气象积雪因子		
影响因子	分级区间	级别	影响因子	分级区间	级别
高程/m	<2400	Ⅰ	平均温度/℃	< −8.3	Ⅰ
	2400~2700	Ⅱ		−8.3~−7.8	Ⅱ
	2700~3000	Ⅲ		−7.8~−7.4	Ⅲ
	3000~3300	Ⅳ		−7.4~−6.9	Ⅳ
	>3300	Ⅴ		−6.9~−6.6	Ⅴ
坡度/m	0~15	Ⅰ	平均降雪量/cm	<18	Ⅰ
	15~30	Ⅱ		18~19	Ⅱ
	30~45	Ⅲ		19~20	Ⅲ
	45~60	Ⅳ		20~21	Ⅳ
	>60	Ⅴ		>21	Ⅴ
地表切割度/m	0~30	Ⅰ	最大积雪深度/cm	<55	Ⅰ
	30~60	Ⅱ		55~57.5	Ⅱ
	60~90	Ⅲ		57.5~60	Ⅲ
	90~120	Ⅳ		60~62.5	Ⅳ
	>120	Ⅴ		62.5~65	Ⅴ
地面粗糙度	0~0.2	Ⅰ	最大风速/(m·s^{-1})	<15.6	Ⅰ
	0.2~0.4	Ⅱ		15.6~15.7	Ⅱ
	0.4~0.6	Ⅲ		15.7~15.9	Ⅲ
	0.6~0.8	Ⅳ		15.9~16.1	Ⅳ
	>0.8	Ⅴ		>16.1	Ⅴ

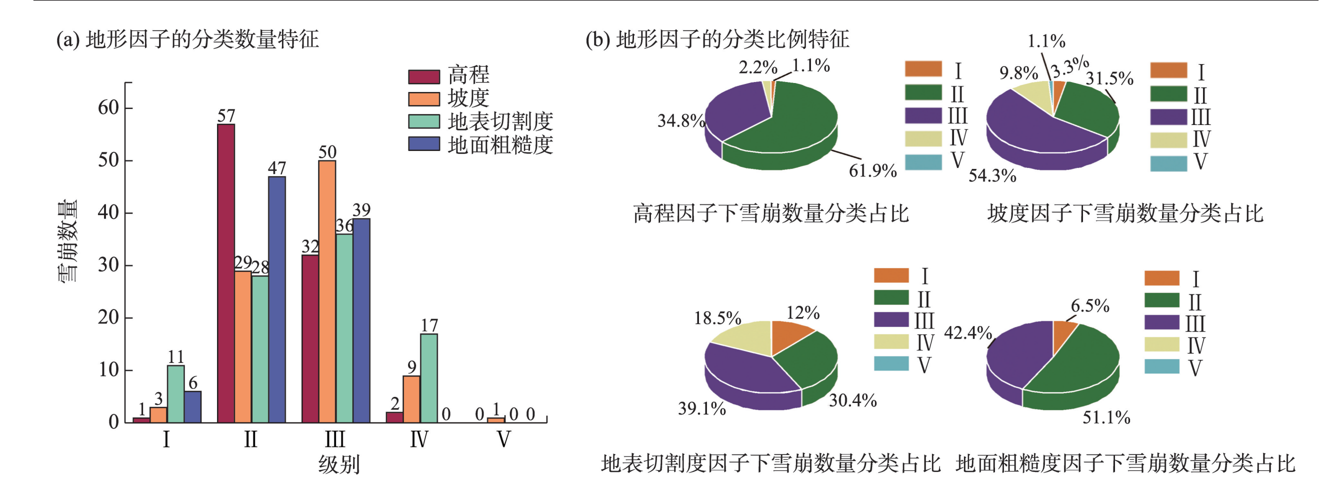


图4　雪崩地形因子的分类数量和比例特征

Fig. 4　Classification and quantity ratio characteristics of avalanche terrain factors

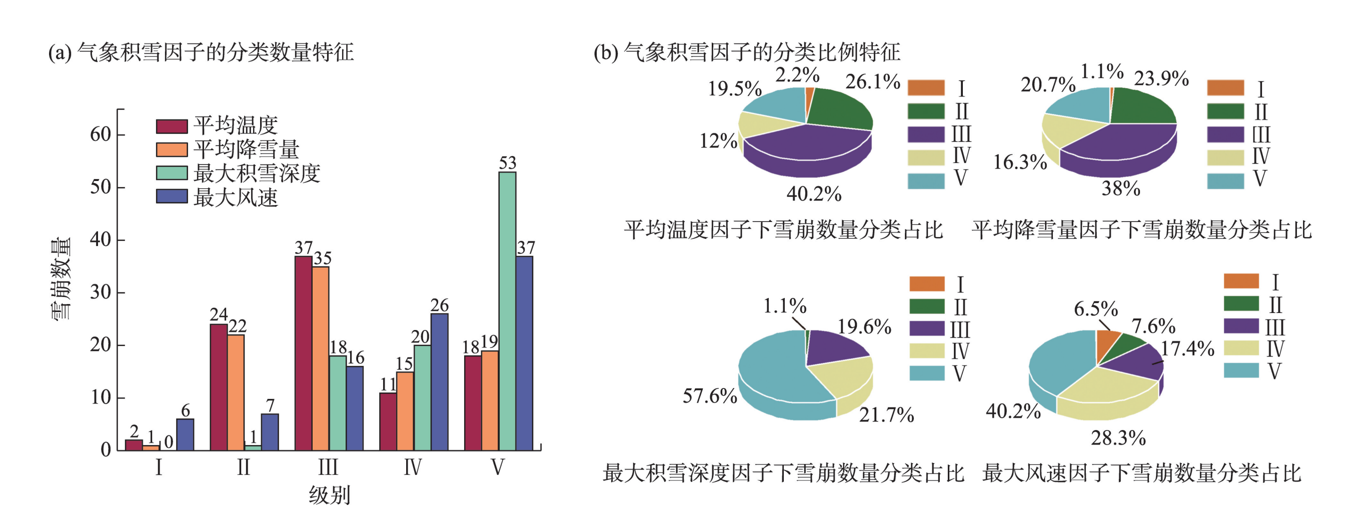


图5　雪崩气象因子的分类数量和比例特征

Fig. 5　Classification and quantity ratio characteristics of avalanche climatic snow cover factors

子的判定,分析结果如图6所示。

运用Pearson相关系数法及灰色关联系数法分析得出:8个自变量与雪崩数量之间相关系数均大于0.6,且与雪崩稳定性之间存在较强的正相关。灰色关联度法、Pearson相关系数法均未考虑因变量的空间分异性,无法反映出数据列的空间差异特征。

坡度、地面粗糙度分辨率越高,雪崩稳定性的解释力q值越大,高程、地表切割度分辨率越高,雪崩稳定性的解释力q值越小,因此,坡度、地面粗糙度对雪崩稳定性解释力与分辨率呈正相关,高程、地表切割度对雪崩稳定性解释力与分辨率呈负相关。不同分辨率的地形驱动因子对雪崩稳定性解释力q值由大到小的排序均是坡度、高程、地面粗糙度、地表切割度,运用地理探测器分析无人机获取的高精度DEM与其他尺度的DEM得出,地形因子的q值变化幅度较小,反映出地理探测器对不同分辨率的地形因子敏感性较低。

运用地理探测器分析不同影响因子对雪崩稳定性的驱动力,地形因子中解释力最大的是坡度,因此,坡度对雪崩的发育尤为重要,其次是气象积雪因子中的最大积雪深度解释力较强,高程、最大风速、地面粗糙度对雪崩的稳定性解释力次之。

4.2　雪崩影响因子交互作用分析

利用地理探测器中的交互作用探测不同分辨率下的地形因子以及气象积雪因子,双因子作用时对雪崩稳定性的解释力,8个影响因子两两交互探测结果如图7所示。

由图7可知,双因子交互探测的解释力明显增

强，均显著高于任意单因子，对雪崩稳定性增强作用均是双因子增强或者非线性增强，0.43 m分辨率下地形因子与其他因子两两交互非线性增强17对，双因子增强11对；5 m分辨率下地形因子与其他因子两两交互非线性增强17对，双因子增强11对；10 m分辨率下地形因子与其他因子两两交互非线性增强18对，双因子增强10对；12.5 m分辨率下地形因子与其他因子两两交互非线性增强19对，双因子增强9对；20 m分辨率下地形因子与其他因子两两交互非线性增强22对，双因子增强6对；不同分辨率地形因子与其他因子两两交互，非线性增强比双因子增强更加显著，影响因子之间不存在独立作用，体现出雪崩的稳定性是由多种影响因素共同作用的结果。

在本研究区，不同分辨率下的地面粗糙度与任意驱动因子交互作用时的解释力均大于驱动因子单独作用时的解释力之和，交互作用均是非线性增

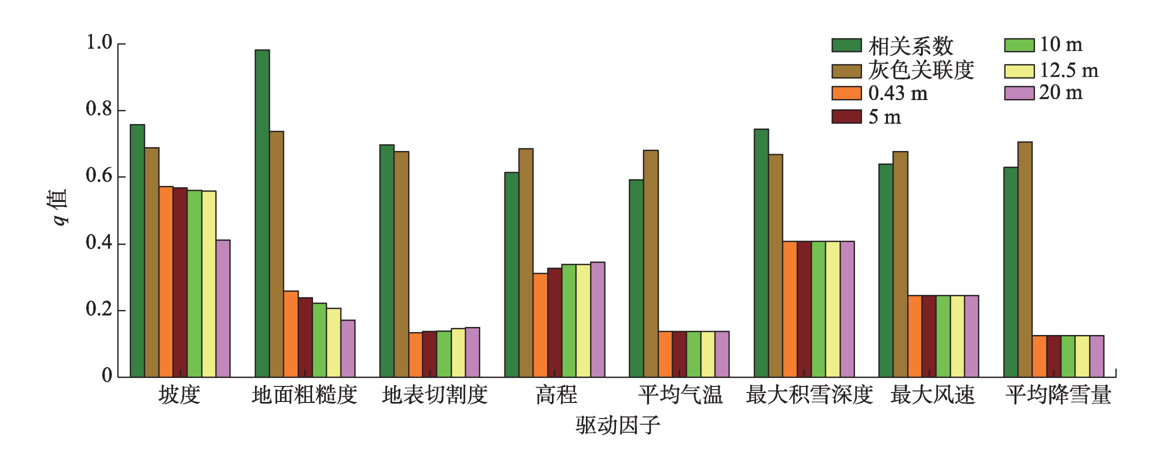


图6 单因子探测结果

Fig. 6 Single factor detection results

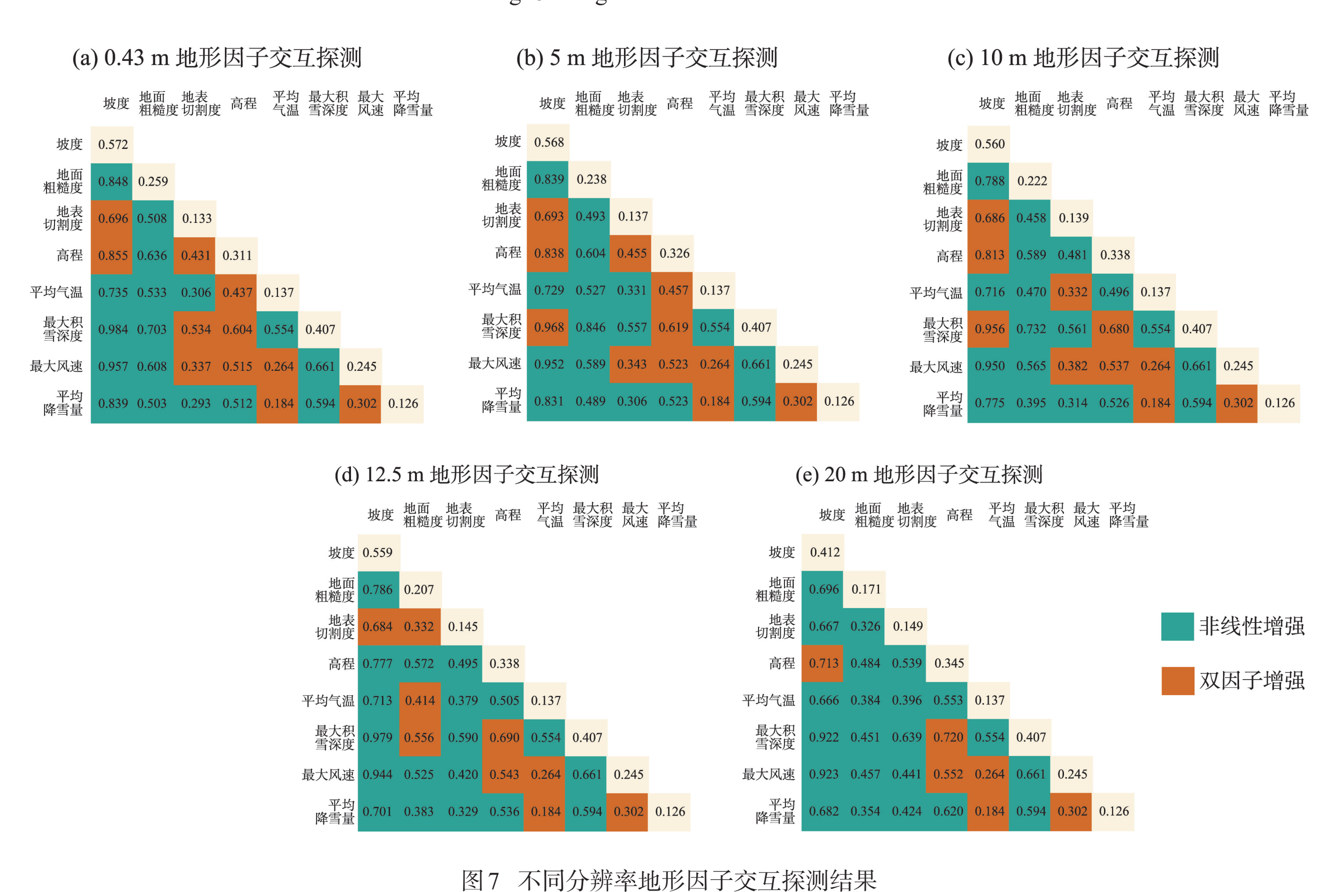


图7 不同分辨率地形因子交互探测结果

Fig. 7 Interactive detection results of terrain factors with different resolutions

强。坡度与其他7个因子相互作用时对雪崩稳定性的解释力较高,坡度与最大积雪深度共同作用时对雪崩稳定性解释力最大,不同分辨率下的结果均高于0.9,其中,0.43 m分辨率下的坡度与最大积雪深度解释力达到0.984,且坡度与其他因子交互解释力均不低于0.5,充分说明了坡度与其他驱动因子结合对雪崩稳定性影响至关重要。

5 结 论

本文以拟建独库高速公路阿尔先沟段为研究对象,利用空中无人机遥感解译与地面现场调研协同的方法识别92处雪崩点,选取高程、坡度、地表切割度、地面粗糙度、平均温度、平均降雪量、最大风速、最大积雪深度8个驱动因子,运用地理探测器进行雪崩的空间分异性研究,得出以下结论:

(1)根据雪崩点的坡度、坡向、雪深等分析得出,稳定性较差、不稳定、极其不稳定的雪崩点占总数的73.9%。该研究区段雪崩发育较为活跃,稳定性较差,但较多雪崩释放区、运动区对拟建线路无影响,堆积区位于远离拟建线路的谷底,对路基、桥梁、隧道洞口等造成严重影响仅占总数的9.8%。

(2)对8个驱动因子雪崩空间分布分析,在天山山区高程3000 m区域雪崩发育较为频繁,坡度为30°~45°雪崩最为活跃,地面越粗糙,对雪崩的发育阻碍越大,随着最大积雪深度、最大风速的增大,雪崩数量逐渐增多。

(3)本研究区采用地理探测器分析不同分辨率地形因子及气象积雪因子与雪崩稳定性的关系,得出坡度、地面粗糙度对雪崩稳定性贡献力与分辨率呈正相关,高程、地表切割度对雪崩稳定性贡献力与分辨率呈负相关。不同分辨率的地形因子的q值变化幅度较小,在分析雪崩稳定性时,地理探测器对不同分辨率的地形因子敏感性较低。

(4)不同分辨率的地形因子与其他因子交互探测,对雪崩稳定性均是双因子增强或者非线性增强,非线性增强比双因子增强更加显著。地面粗糙度与任意影响因子交互作用均是非线性增强,坡度与最大积雪深度共同作用时对雪崩稳定性解释力最大,且与其他因子交互解释力不低于0.5,坡度与其他因子结合对雪崩稳定性影响至关重要,雪崩的稳定性是由多种影响因素共同作用的结果。

致谢:此次野外调研设备与数据均由新疆交通规划勘察设计研究院有限公司提供,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] 胡汝骥, 马维林, 王存牛. 中国天山的雪崩及其治理[J]. 冰川冻土, 1987, 9(S1): 13-24, 150. [Hu Ruji, Ma Weilin, Wang Cunniu. Avalanches in Tianshan Mountains, China, and their control[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(S1): 13-24, 150.]

[2] 杨金明, 张旭, 毛炜峄, 等 中国天山雪崩灾害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 188-197. [Yang Jinming, Zhang Xu, Mao Weiyi, et al. Investigation and analysis of snow avalanche disaster in Tianshan Mountains of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1): 188-197.]

[3] 郝建盛, 李兰海. 雪崩灾害防治研究进展及展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 762-770. [Hao Jiansheng, Li Lanhai. Research progress and prospect of snow avalanche disaster prevention and control[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 762-770.]

[4] 马东涛, 崔鹏, 王忠华. 中尼公路雪害及防灾对策[J]. 山地学报, 2002, 20(1): 59-63. [Ma Dongtao, Cui Peng, Wang Zhonghua. An approach on snow hazards and their countermeasures along Sino-Nepalese highway[J]. Mountain Research, 2002, 20(1): 59-63.]

[5] 胡汝骥, 马虹, 姜逢清. 中国天山积雪雪崩站区的地理环境[J]. 干旱区地理, 1997, 20(2): 25-33. [Hu Ruji, Ma Hong, Jiang Fengqing. Geographical environment in the area of Tianshan station for snow & avalanche research Yili, Xinjiang, China[J]. Arid Land Geography, 1997, 20(2): 25-33.]

[6] 王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 12-26. [Wang Jian, Che Tao, Li Zhen, et al. Investigation on snow characteristics and their distribution in China [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 12-26.]

[7] 刘洋, 李兰海, 杨金明, 等 D-InSAR技术的积雪深度反演[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 802-809. [Liu Yang, Li Lanhai, Yang Jinming, et al. Snow depth inversion based on D-InSAR method[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2018, 22(5): 802-809.]

[8] Bulajić B Đ, Bajić S, Stojnić N. The effects of geological surroundings on earthquake-induced snow avalanche prone areas in the Kopaonik region[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 149: 29-45.

[9] 郝建盛, 黄法融, 冯挺, 等. 亚洲高山区雪崩灾害时空分布特点及其诱发因素分析[J]. 山地学报, 2021, 39(2): 304-312. [Hao Jiansheng, Huang Farong, Feng Ting, et al. Analysis of spatio temporal distribution characteristics of snow avalanche disaster and its triggering factorsin the high mountain Asia[J]. Mountain Research, 2021, 39(2): 304-312.]

[10] 郝建盛, 崔鹏, 张雪芹, 等. 天山中部大陆性雪气候条件下不同

类型雪崩的诱发机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(12): 2428-2440. [Hao Jiansheng, Cui Peng, Zhang Xueqin, et al. The triggering mechanisms for different types of snow avalanches in the continental snow climate of the central Tianshan Mountains[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2022, 52(12): 2428-2440.]

[11] 文洪, 王栋, 王生仁, 等. 藏东南帕隆藏布流域雪崩关键影响因素与易发性区划研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 404-415. [Wen Hong, Wang Dong, Wang Shengren, et al. Key predisposing factors and susceptibility mapping of snow avalanche in Parlung-Tsangpo catchment, Southeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 404-415.]

[12] Liu Y, Li L, Chen X, et al. Spatial distribution of snow depth based on geographically weighted regression Kriging in the Bayanbulak Basin of the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(1): 33-45.

[13] Armelle D, Najat B, Janie F R, et al. The Development of Kangiqsualujjuaq and the Threat of Snow Avalanches in a Permafrost Degradation Context, Nunavik, Canada[M]. Université des Sciences et Technologies de Lille, 2020.

[14] 杨维涛, 孙建国, 马恒利, 等. 地貌形态多尺度综合分类方法[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 638-645. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Ma Hengli, et al. A multi-scale integrated classification method for landforms [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 638-645.]

[15] Bühler Y, Kumar S, Veitinger J, et al. Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2013, 13 (5): 1321-1325.

[16] Soteres R L, Javier P, Carrasco R M. Snow avalanche susceptibility of the Circo de Gredos (Iberian Central System, Spain)[J]. Journal of Maps, 2020, 16(2): 1717655.

[17] Caiserman A, Sidle R C, Raj G D. Snow Avalanche Frequency Estimation (SAFE): 32 years of monitoring remote avalanche depositional zones in high mountains of Afghanistan[J]. The Cryosphere, 2022, 16(8): 3295-3312.

[18] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[19] 李鑫磊, 李瑞平, 王秀青, 等. 基于地理探测器的河套灌区林草植被覆盖度时空变化与驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40 (4): 623-635. [Li Xinlei, Li Ruiping, Wang Xiuqing, et al. Spatiotemporal change and analysis of factors driving forest-grass vegetationcoverage in Hetao Irrigation District based on geographical detector [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 623-635.]

[20] 周金, 范秋雁, 朱真. 基于地理探测器的广西泥石流地质灾害驱动因子分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(11): 245-248. [Zhou Jin, Fan Qiuyan, Zhu Zhen. Analysis of the driving factors of the geological disaster of debris flow in Guangxi based on the geographic detector[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(11): 245-248.]

[21] 季建万, 姜琳琳, 刘文亮, 等. 基于多参数优选地理探测器的京津冀城市群地质灾害影响因子分析[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(2): 39-45. [Ji Jianwan, Jiang Linlin, Liu Wenliang, et al. Analysis on influence factors of geological hazards in Beijing-Tianjin- Hebei urban agglomeration based on multi- parameters optimized by geodetector[J]. Geography and Geo-Information Science, 2023, 39(2): 39-45.]

[22] Zhu Z, Wang J, Hu M, et al. Geographical detection of groundwater pollution vulnerability and hazard in Karst areas of Guangxi Province, China[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 627-633.

[23] 刘笑, 郭鹏, 祁佳峰, 等. 基于MRSEI模型的阿勒泰市生态环境时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 1014-1026. [Liu Xiao, Guo Peng, Qi Jiafeng, et al. Spatio- temporal changes and driving forces in the ecological environment of Altay City determined using an MRSEI model[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 1014-1026.]

[24] Hao J, Mind'je R, Liu Y, et al. Characteristics and hazards of different snow avalanche types in a continental snow climate region in the Central Tianshan Mountains[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13: 317-331.

[25] 史志文, 徐俊荣, 陈忠升, 等. 天山西部寒区山地生态系统近40年来气候变化特征——以中国科学院天山积雪雪崩研究站为例[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 41-48. [Shi Zhiwen, Xu Junrong, Chen Zhongsheng, et al. Analysis on cimatic changes under global cliatic change: A case study of Tianshan snow and avalanche research station[J]. Mountain Research, 2009, 27(1): 41-48.]

[26] 支泽民, 陈琼, 张强, 等. 地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用——以西藏江达县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 19-26. [Zhi Zemin, Chen Qiong, Zhang Qiang, et al. Application of geographic detector in identifying influencingfactors of landslide stability: A case studyof the Jiangda County, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 19-26.]

[27] 陈联君. 基于多源数据的雪崩危险性评价一以北疆地区为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2021. [Chen Lianjun. Avalanche Hazard Assessment Based on Multi-Source Data: A Case Study inNorthern Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.]

[28] Singh D K, Mishra V D, Gusain H S, et al. Geo-spatial Modeling for Automated Demarcation of Snow Avalanche Hazard Areas Using Landsat-8 Satellite Images and In Situ Data[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(3): 513-526.

[29] Nicolas E, Florie G. Towards a holistic paradigm for long- term snow avalanche risk assessment and mitigation[J]. Ambio, 2022, 52(4): 711-732.

[30] 汶林科, 向灵芝, 蔡毅, 等. 雪崩的形成机理研究[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 1-11. [Wen Linke, Xiang Lingzhi, Cai Yi, et al. Research on the formation mechanism of avalanche[J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 1-11.]

[31] John S, Pascal H, Yves B. Automated snow avalanche release area

delineation in data-sparse, remote, and forested regions[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22(10): 3247−3270.

[32] 苗运玲, 于永波, 霍达, 等. 中天山北坡冬季降雪变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 9−18. [Miao Yunling, Yu Yongbo, Huo Da, et al. Analysis of winter snowfall variability and its influencing factors on the north slopes of the middle Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 9−18.]

[33] 刘海松, 范敏, 倪万魁, 等. 灰色关联度法在公路地质灾害危险性评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005(3): 32−34. [Liu Haisong, Fan Min, Ni Wankui, et al. Application of the method of gray correlation in riskevaluation of highway geological hazard[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(3): 32−34.]

Spatial distribution and factor analysis of avalanche in the Aerxiangou section of the Duku expressway

CHENG Qiulian[1,2], LIU Jie[1,2], YANG Zhiwei[2], ZHANG Tianyi[1,2], WANG Bin[2]

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute Co. Ltd., Technology Research and Development Center, Urumqi 830006, Xinjiang, China)

Abstract: The proposed Aerxiangou section of the Duku expressway, characterized by high mountainous terrain and canyons, faces frequent avalanches due to heavy snowfall and climate change. In this study, a collaborative investigation using UAV remote sensing interpretation and field research identified 92 avalanche points. In addition, elevation, slope, surface cutting degree, ground roughness, maximum snow depth, maximum wind speed, average temperature, and average snowfall were selected as driving factors. A geographical detector was used to examine the relationship between terrain factors, different resolutions, and avalanche stability. The results of this study revealed strong avalanche activity with generally poor stability in the study area. However, it was reassuring to note that most avalanche release and activity areas are located on mountain slopes. The accumulation area lies on the valley floor, a considerable distance away from the planned road route, thus minimizing its impact. Results from the geographical detector analysis suggest positive correlations between interpretations of slope and ground roughness with snow avalanche stability across varying resolutions. The interactive detection results are both double-factor enhancement and nonlinear enhancement, with the latter being more significant than the former. The combination of slope and other factors is crucial for determining the impact of avalanche stability. This study offers reliable data support for assessing avalanche vulnerability and risks, thereby establishing a solid scientific basis for constructing and operating the Duku expressway.

Keywords: Aerxiangou; avalanche; geographical detector; driving factors; spatial distribution